无金属碳基催化剂在电催化合成过氧化氢中的研究进展

董 祺[1,2],罗明生[1,2*],宋焕巧[1,2]
(1.北京石油化工学院新材料与化工学院,北京 102617;
2.燃料清洁化及高效催化减排技术北京市重点实验室,北京 102617)

摘要:系统综述了无金属碳基催化剂在电催化合成过氧化氢领域的最新研究进展。阐述了 $2e^-$ ORR 的基本反应机理及核心性能评估方法;按不同维度分类深入探讨了相应无金属碳基催化剂的结构特点以及调控策略;展望了该类催化剂的未来研究方向和发展趋势,为高效电合成 H_2O_2 的无金属碳催化剂的精准设计提供了新思路。

关键词:电催化;过氧化氢;无金属碳材料;两电子氧还原反应;微观结构
中图分类号:TQ123.6 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0031-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.006

Research progress on metal-free carbon-based catalysts for the electrochemical synthesis of hydrogen peroxide

DONG Qi[1,2], *LUO Ming-sheng*[1,2*], *SONG Huan-qiao*[1,2]
(1.College of New Materials and Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2.Beijing Key Laboratory of Clean Fuels and Efficient Catalytic Emission Reduction Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: The recent advances in metal-free carbon-based catalysts for electrocatalytic H_2O_2 synthesis are systematically reviewed.The fundamental reaction mechanisms of $2e^-$ ORR and the core performance evaluation methods are elucidated.Subsequently,the structural characteristics and modulation strategies of metal-free carbon-based catalysts are discussed in depth,classified according to their dimensionality.Finally,the future research directions and development trends regarding these catalysts are proposed.This review provides new insights for the rational design of metal-free carbon catalysts toward efficient H_2O_2 electrosynthesis.

Key words: electrocatalysis; hydrogen peroxide; metal-free carbon materials; two-electron oxygen reduction reaction; microstructure

过氧化氢(H_2O_2)作为一种重要的工业化学品,凭借“绿色”特性和强氧化能力,已被广泛应用于医疗消毒、造纸漂白、废水处理及精细化工合成等领域[1-3]。目前,H_2O_2 的工业化生产主要依赖蒽醌法,该方法存在工艺流程复杂、能耗高以及一定的安全隐患问题。近年来,基于两电子氧还原反应($2e^-$ ORR)的电化学合成法,仅以空气中的氧气(O_2)和水(H_2O)为原料,为 H_2O_2 的制备和生产提供了一条极具潜力的绿色替代路径[4]。然而,该反应本身存在动力学迟缓的特性,且易受四电子氧还原反应($4e^-$ ORR)路径的竞争[5]。因此,开发高活性、高选择性的电催化剂,对于推动这一极具前景的技术发展至关重要。

迄今为止,贵金属及其合金(如 Pd[6]、Pt[7]、Pd-Hg[8]、Au-Pd[9]等)可在较低的过电位下展现出优异的氧还原活性和 H_2O_2 选择性,但高昂的成本和稀缺性严重阻碍了大规模工业化应用。相比之下,碳材料因储量丰富、成本低廉且结构可调等优势,在电催化领域备受关注[10]。然而,无金属碳基催化剂的本征活性和长期稳定性仍有待提高。构建各类纳米结构(零维、一维、二维、三维结构)可显著提升比表面积、活性位点暴露程度、质量扩散效率及电导率,这些是提高 $2e^-$ ORR 电催化性能的关键要素。基于 $2e^-$ ORR 的基本原理,重点梳理了近年来不同维度的无金属碳基催化剂在 $2e^-$ ORR 制备 H_2O_2 中的研究进展,重点分析了近期研究中的创新发现与发展趋势,最后展望了电化学合成 H_2O_2 技术领域未来面临的核心挑战和发展机遇。

1 $2e^-$ ORR 电合成过氧化氢技术

氧还原反应(ORR)涉及复杂的多电子转移过

收稿日期:2026-01-23;**修回日期**:2026-08-28
基金项目:国家自然科学基金项目(21805012)
作者简介:董祺(2002-),男,硕士生;罗明生(1966-),男,博士,教授,研究方向为催化与材料,通讯联系人,luoms9297@163.com。

程,主要存在2条反应路径:二电子转移路径生成H_2O_2,四电子转移途径转化为H_2O。吸附在电极表面的O_2分子首先与电子(e^-)和质子(H^+)结合形成$^*OOH$中间体,该中间体可进一步捕获1个e^-和1个H^+生成H_2O_2。此外,$^*OOH$中间体的O—O键可能发生解离,经后续反应最终生成H_2O。可见,通过调控$^*OOH$从电极表面的解离过程,可实现以H_2O_2为主要产物的选择性调控,相关反应如方程式(1)~(3)所示:

$$* + O_2 + H^+ + e^- \longrightarrow {}^*OOH \quad (1)$$

$$^*OOH + H^+ + e^- \longrightarrow H_2O_2 + * \quad (2)$$

$$^*OOH + H^+ + e^- \longrightarrow {}^*O + H_2O \quad (3)$$

理论而言,适用于H_2O_2合成的高效ORR催化剂应需同时具备2项特性:一是对O_2分子具有较强的吸附能力,以实现O_2的活化并生成关键的$^*OOH$中间体;二是对$^*OOH$保持较弱的吸附强度,以促进H_2O_2或$^*OOH$在不同电解质中的释放。无论ORR遵循$2e^-$还是$4e^-$催化反应机制,O_2的化学吸附及其后续活化过程,均是2种途径共有的初始关键步骤,且这些步骤对催化反应机制的调控具有决定性作用。

2 $2e^-$ ORR的无金属碳基催化剂

2.1 零维碳材料

零维碳材料(如碳量子点、石墨烯量子点和炭黑)具备丰富的边缘位点、可调节的杂原子掺杂特性以及量子限域效应,在电化学合成H_2O_2领域应用前景广阔。其中,碳量子点(CQDs)自身的纳米级尺寸赋予了其极高的比表面积,使得绝大多数碳原子暴露在固-液界面[11]。这一结构优势为氧官能团的修饰提供了丰富的物理空间,解决了氧化碳材料中氧含量普遍较低(<16%)的难题,Guo等[12]制备了氧含量高达30.4%的CQDs催化剂,该催化剂在碱性电解质中对H_2O_2的选择性接近100%。高含氧特性赋予CQDs对$^*OOH$中间体的适度吸附能力,既可抑制$^*OOH$进一步还原为H_2O,又能将反应路径定向诱导至$2e^-$ ORR。Ni等[13]借助CQDs的结构特性揭示了醛基(—CHO)、羟基(—OH)和羧基(—COOH)在酸性介质电合成H_2O_2转化过程中的促进作用。理论计算表明,表面功能化修饰引发的碳边缘位点重构,可调控$2e^-$ ORR路径中含氧中间体$^*OOH$的吸附行为。类似的电子调控作用也能在零维材料表面得到充分放大,Fan等[14]采用N、B共掺杂改性石墨烯量子点(GQDs)。研究表明,相较于块体或高维碳材料,经相同表面改性的GQDs表现出更明显的$2e^-$ ORR催化倾向,H_2O_2产率高达709 mmol/(g·h)。

上述工作主要以碳点为主,而炭黑作为碳载体或导电剂在电化学领域应用广泛,具备的高比表面积和导电网络可促进表面官能团的充分暴露与电子局域化,有利于降低能垒,并提高催化反应的质量活性电流密度与H_2O_2选择性。Wang等[15]采用氧气等离子体法处理炭黑得到CB-Plasma,引入大量缺陷以及含氧官能团,实现了法拉第效率为100%的电合成H_2O_2。催化剂在0.1 mA/cm^{2}的电流密度下展现出0.8 V的极高起始电位,超越了$2e^-$ ORR的热力学平衡电位(0.75 V)。在去除大部分含氧基团后,材料仍能保持300 A/g的高质量活性,这一策略为开发新型高性能无金属碳基H_2O_2电催化剂提供了重要思路。

2.2 一维碳材料

与零维碳材料相比,一维纳米结构的独特优势在于可构建连续且高效的电子传输通道,加之其本身具备高导电性、充足的孔隙率及原料易获取等特性,使其在电合成H_2O_2领域作为高效、低成本催化剂有着巨大优势。碳纳米管(CNTs)作为典型的一维碳材料,因具有优异的电子导电性以及丰富的孔隙结构,成为该领域重点研究的对象。Shi等[16]考虑到CNTs的曲率应变与缺陷结构更易容纳五元环相关构型,确保吡咯氮位点充分暴露在固-液界面,利用吡咯单体与CNTs制备出了吡咯氮含量高达90%的N_{pyr}-O-CNTs。同时,CNTs优异的轴向导电性确保了电子能够快速传递至这些特定的吡咯氮活性中心,使吡咯氮的本征优势在旋转环盘电极(RRDE)等电化学评估中体现为更高的H_2O_2选择性与产率。结果表明,N_{pyr}-O-CNTs表现出99%的H_2O_2选择性和0.71 V的高起始电位。此外,该材料在流通池中实现了约7.5 g/(L·h)的高H_2O_2产率,这得益于CNTs中稳定的石墨晶格。

凭借独特的中空几何结构及弹道载流子传导特性,壁层相对完整的CNTs能在高电流密度下有效促进氧气与过氧化氢的质量传递[17]。在此背景下,Long等[18]提出CNTs在球磨过程中通过交叉点可能发生的断裂机制,由此产生大量更易受杂原子修饰的CNTs尖端,实现了对尖端原子环境的精确调控,如图1所示。将催化剂实际应用在固态电解槽中,在300 mA/cm^{2}的电流密度下,H_2O_2产率最高为4.35 mmol/(cm^2·h),实现了工业级电流密

度下高效电合成 H_2O_2。除此之外,这类尖端功能化的碳纳米管在其他实际应用中有望展现出巨大潜力。

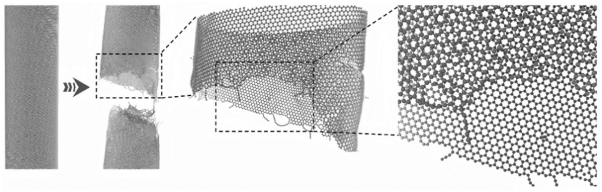
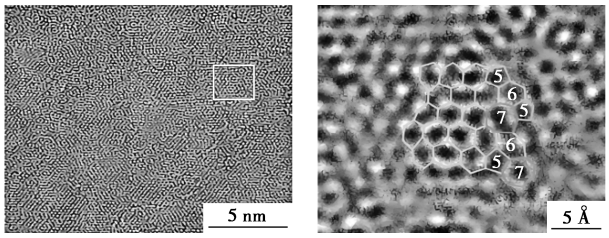


图 1　碳纳米管断裂构型示意图

除了 CNTs 外,最新研究表明纳米纤维的连续一维形貌与多孔结构有助于反应物扩散与催化位点的高效利用,使得原子尺度的掺杂效应可以在宏观电极上被放大并转化为高产率与高法拉第效率[19]。Dong 等[20]直接合成了蜂窝状碳纳米纤维(HCNFs),在碱性介质中展现出 97.3% 的高 H_2O_2 选择性和 220 A/g 的高质量活性。研究表明,一维多孔纤维结构有助于将 O_2 和电解液包裹在缺陷活性位点周围,从而提高 H_2O_2 选择性。Liu 等[21]通过引入 PTFE 对纤维结构进行扩孔,从而最大化活性位点的暴露程度。此外,碳纤维的化学稳定性保证了在酸性、中性和碱性电解液中,催化剂骨架不发生腐蚀或结构坍塌,维持了电子传输通道的完整性。结果表明,在宽 pH 范围(3 ~ 14)内展现出优异的 $2e^-$ ORR 催化活性及过氧化氢制备耐久性。在碱性介质中,可获得高达 7.30 mol/(g·h)的过氧化氢产率,法拉第效率超过 90%。在不依赖金属活性中心的前提下,一维碳材料能够克服有机大环分子或无定形碳导电性差的缺陷,有效防止活性位点的团聚与掩埋,为实现高选择性产 H_2O_2 与高单位质量反应速率提供重要保障。

2.3　二维碳材料

二维材料有着独特的片状形貌结构,高比表面积可保障活性位点充分暴露出来,其显著优势使其在电催化领域受到广泛关注。近年来,石墨烯凭借单原子层 sp^2 杂化碳网络赋予的优异导电性、高比表面积及良好的化学稳定性,在电合成 H_2O_2 领域具备重要应用潜力。Peng 等[22]将石墨烯与介孔碳复合,有效地改善了材料的导电性与活性位点富集。以吡咯氮为主的活性位点可以调节 $^*OOH$ 的吸附构型,为 H_2O_2 的产生提供了动力学上的有利支撑。结果显示,该复合材料在碱性电解液中的 H_2O_2 选择性约为 91%,并且 H_2O_2 产率高达 30 mol/(g·h)。考虑到石墨烯二维平面的可修饰性,Mou 等[23]在石墨烯基面内构建 S-C-N 配位结构及五/七元环缺陷(图 2),通过杂原子与缺陷协同调控碳骨架上活性位点的电子态,优化其对 $^*OOH$ 的结合强度。结果表明,该催化剂在酸性、中性及碱性电解质中分别展现出 83%、96%和 99%的超高 H_2O_2 选择性。



(a)　　(b)

图 2　SNC 透射电镜图像

原位生成的 H_2O_2 通常会在催化层中被进一步还原为 H_2O,为解决此问题,有研究人员提出增强局部扩散作用以促进 H_2O_2 的快速逸出。Tian 等[24]通过引入不同尺寸孔结构,合成了多孔二维碳纳米片,如图 3 所示。所制备的介孔碳纳米片在电催化合成 H_2O_2 反应中表现出优异性能,H_2O_2 选择性高于 95%,还实现了高达 3.1 mA/cm^2 的扩散限制电流密度。实验发现,介孔碳纳米片的特殊结构借助黏性效应及收缩型流动通道,显著加速了介孔内部的电解液流动速率,具有最低的 Tafel 斜率(68 mV/dec),验证了介孔修饰的二维碳结构在提高局部扩散方面的关键作用。二维片层便于调节孔隙与气液传质路径,有利于提升反应器的 H_2O_2 产率与能效,推动 $2e^-$ ORR 从基础研究转向工业化。

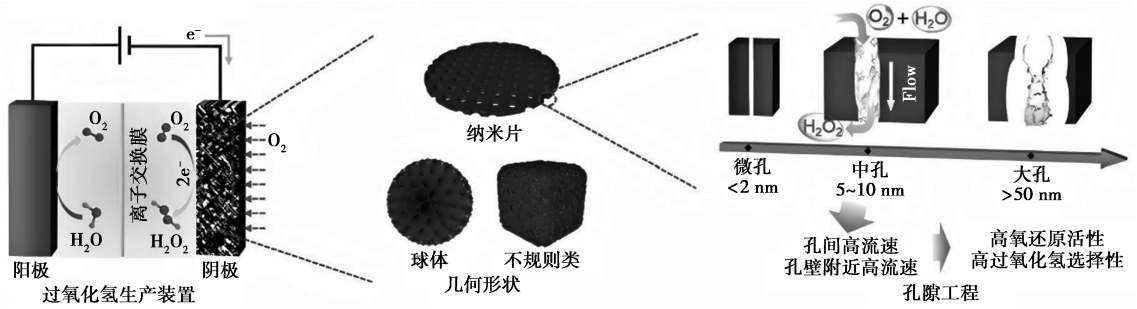


图 3　多孔二维结构示意图

2.4 三维碳材料

三维碳基材料通过构建互联导电骨架与层级孔通道,显著增加稳定三相界面并降低氧传质阻力,极大缓解了电合成 H_2O_2 过程中的传质限制,从而在较高电流密度或空气供氧等传质受限条件下维持更高的 $2e^-$ ORR 选择性与过氧化氢生成速率。Qi 等[25]受水葫芦天然交联骨架的启发,构建了三维碳纳米网(3D-N-CNW),比表面积高达 1 464 m^2/g。研究发现,三维交联网络结构在促进氧气与电解液质量传输的同时,还能构建丰富的富氧微环境,为 $2e^-$ ORR 高效合成 H_2O_2 提供了结构与微环境层面的双重保障。随后通过氨刻蚀技术比较了不同维度碳材料的电化学性能,3D-N-CNW 在酸性介质中具有最高过氧化氢产率与法拉第效率,并且过氧化氢选择性高达 93%,这是酸性介质中目前性能最佳的无金属碳基催化剂。Xia 等[26]以煤粉为前驱体,采用溶胶-凝胶法结合 CO_2 超临界干燥技术,合成了煤基碳气凝胶。经 CO_2 超临界干燥后的碳凝胶为 $2e^-$ ORR 提供了稳定的三维碳骨架结构。结果表明,催化剂在碱性介质中的 H_2O_2 选择性高达 95%,并在 30 000 s 的长期稳定性测试后催化活性仍保持在 90%以上。

除构建网状多孔结构外,还可以通过设计形貌结构来增加参与反应的电化学活性表面积,有效改善活性位点的暴露程度和电极界面湿润性,从而提高材料的电催化性能。Zhang 等[27]采用化学气相沉积工艺制备出垂直石墨烯,该催化剂在 0~0.6 V 的宽电位范围内展现出约 80%的高法拉第效率,最大电流密度达到 140 mA/cm^2。如图 4 所示,这种垂直排列的石墨烯结构有效地增大催化剂的电化学活性表面积,有利于活性位点暴露和加快传质速率,双电层电容高达 5.32 mF/cm^2。此外,石墨烯的高导电性以及不需添加黏结剂的自支撑结构确保了催化剂活性位点与基底之间快速的电子传递,对应在酸性介质中的 H_2O_2 产率高达 21 mol/(g·h)。Lee 等[28]通过气溶胶喷雾干燥法制备了三维褶皱石墨烯(OCG-800)。研究发现,OCG-800 独特的三维皱褶形貌可有效抑制片层堆叠,解决了传统二维石墨烯片易发生堆叠团聚而导致活性位点暴露不足和质量传输效率低下等问题。

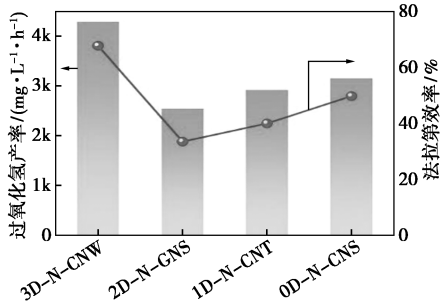
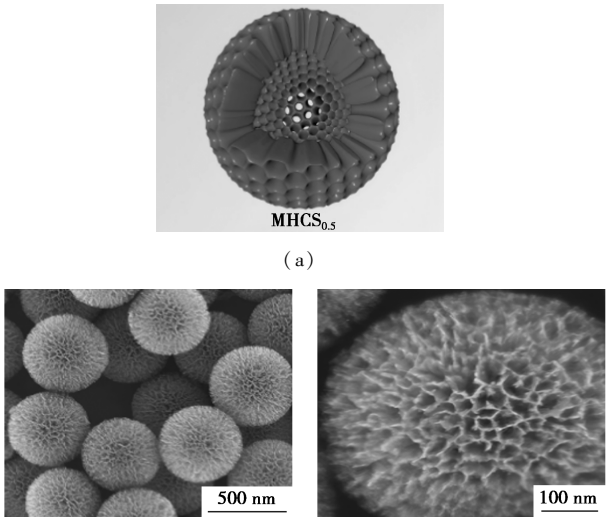


图 4 不同维度的氮掺杂碳材料电化学性能

为了评估三维结构在实际应用中的可行性,Tian 等[29]设计并制备了一种具有介孔空心碳球结构的 $MHCS_{0.5}$,在增强 ORR 动力学的同时又提高了材料的氧气吸附能力,为 $2e^-$ ORR 营造适宜的微环境(图 5)。$MHCS_{0.5}$ 在中性和碱性电解液中的扩散限制电流密度分别为 2.8、3.1 mA/cm^2,并且 H_2O_2 选择性均达到了 85%以上。组装成流动电池装置后,$MHCS_{0.5}$ 成功制备出医用级过氧化氢消毒剂,具有纳米反应器工程化的巨大应用潜力。这项工作不仅为三维碳材料的功能化设计提供了新思路,也为其在不同 pH 条件下电合成 H_2O_2 的工业应用提供了重要参考。



(a) (b) (c)

图 5 $MHCS_{0.5}$ 结构模型及扫描电镜图

3 结语与展望

基于碳纳米材料的电化学 H_2O_2 制备技术,因兼具环境友好、成本低廉及效率可控等核心优势,已引起了广泛的研究关注。当前 $2e^-$ ORR 电催化领域的实验探索与理论计算均取得显著进展,重点聚焦于高效无金属碳基电催化剂的材料结构精准设计策略以及结构-性能构效关系分析。相关研究显示,无金属碳材料的 $2e^-$ ORR 性能主要由其微观结构和表面化学性质决定,其中发达的分级孔隙结构和优异的电子传导能力是实现高效催化的关键结构

基础。依靠精准调控无金属碳材料的微观结构和表面功能,可显著优化电催化性能,使其符合工业应用中的实际需求。

尽管无金属碳基催化剂在 $2e^-$ ORR 电合成 H_2O_2 领域已经取得了显著进展,但该类材料在推动 H_2O_2 电催化合成技术走向工业化应用仍面临诸多挑战。除精准的材料结构设计外,阐明 $2e^-$ ORR 电催化机理仍然是该领域的重要研究重点。当前无金属碳基电催化剂的反应机理尚未完全明晰,且其活性位点在电化学反应过程中常伴随动态演变现象,亟需借助各种原位表征技术来直接探测电化学 H_2O_2 生成过程中的关键反应中间体、活性位点及其相互作用机制,为催化剂的定向设计提供本质性机理支撑。另外,还需要在进一步提升电催化本征活性与 H_2O_2 选择性的同时,保障催化剂在长期连续运行过程中的结构与性能稳定性,以及开发适配工业需求的高性能碳基电极制备技术和反应器设计方案。建议借助 DFT 计算与机器学习,建立 $^*OOH$ 中间体的合成转化路径与催化剂合成可行性之间的映射关系,最终实现从计算到实验制备的定向筛选与快速验证,加速高性能无金属碳基催化剂的研发进程。

参考文献

[1] Xia C, Kim J Y, Wang H. Recommended practice to report selectivity in electrochemical synthesis of H_2O_2 [J]. Nature Catalysis, 2020, 3(8): 605-607.

[2] 潘智勇,邢定峰.过氧化氢市场现状和技术发展趋势[J].现代化工,2021,41(4):11-16.

[3] Bu Y, Wang Y, Han G F, *et al*. Carbon-based electrocatalysts for efficient hydrogen peroxide production [J]. Advanced Materials, 2021, 33(49): 2103266.

[4] Du H, Li C, Liang Y, *et al*. Key strategies and challenging perspectives of carbon-based electrocatalysts for sustainable H_2O_2 production[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 106: 864-879.

[5] Zhao S, Wang D W, Amal R, *et al*. Carbon-based metal-free catalysts for key reactions involved in energy conversion and storage [J]. Advanced Materials, 2019, 31(9): 1801526.

[6] Chang Q, Zhang P, Mostaghimi A H B, *et al*. Promoting H_2O_2 production via 2-electron oxygen reduction by coordinating partially oxidized pd with defect carbon[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2178.

[7] Zhao J, Fu C, Ye K, *et al*. Manipulating the oxygen reduction reaction pathway on pt-coordinated motifs[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 685.

[8] Back S, Na J, Ulissi Z W. Efficient discovery of active, selective, and stable catalysts for electrochemical H_2O_2 synthesis through active motif screening[J]. ACS Catalysis, 2021, 11(5): 2483-2491.

[9] Zhang Y, Lyu Z, Chen Z, *et al*. Maximizing the catalytic performance of Pd@ Au_xPd_{1-x} nanocubes in H_2O_2 production by reducing shell thickness to increase compositional stability[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(36): 19643-19647.

[10] Ma R, Han G F, Li F, *et al*. Rational design of carbon-based electrocatalysts for H_2O_2 production by machine learning and structural engineering [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(23): 2500953.

[11] Xie L, Liang C, Wu Y, *et al*. Isomerization engineering of oxygen-enriched carbon quantum dots for efficient electrochemical hydrogen peroxide production[J]. Small, 2024, 20(37): 2401253.

[12] Guo Y, Zhang R, Zhang S, *et al*. Ultrahigh oxygen-doped carbon quantum dots for highly efficient H_2O_2 production via two-electron electrochemical oxygen reduction[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(10): 4167-4174.

[13] Ni B, Guo H, Yang H, *et al*. Oxygen functionalization of carbon quantum dots enables efficient acidic hydrogen peroxide electrosynthesis[J]. Nature Communications, 2025, 17(1): 221.

[14] Fan M, Wang Z, Sun K, *et al*. N-B-OH site-activated graphene quantum dots for boosting electrochemical hydrogen peroxide production[J]. Advanced Materials, 2023, 35(17): 2209086.

[15] Wang Z, Li Q K, Zhang C, *et al*. Hydrogen peroxide generation with 100% faradaic efficiency on metal-free carbon black[J]. ACS Catalysis, 2021, 11(4): 2454-2459.

[16] Shi Y, Jiao M, Wang C, *et al*. Ultrahigh pyrrolic nitrogen triggers high-activity sites in carbon catalysts for selective oxygen reduction to efficient H_2O_2 production[J]. Carbon, 2025, 242: 120450.

[17] Xu J, Cui Y, Wang M, *et al*. Pyrimidine-assisted synthesis of S, N-codoped few-layered graphene for highly efficient hydrogen peroxide production in acid[J]. Chem Catalysis, 2022, 2(6): 1450-1466.

[18] Long Y, Lin J, Ye F, *et al*. Tailoring the atomic-local environment of carbon nanotube tips for selective H_2O_2 electrosynthesis at high current densities[J]. Advanced Materials, 2023, 35(46): 2303905.

[19] 黄媚佳,胡茂从,姚振华.杂原子掺杂碳基氧还原催化剂研究进展[J].现代化工,2024,44(6):25-29.

[20] Dong K, Liang J, Wang Y, *et al*. Honeycomb carbon nanofibers: A superhydrophilic O_2-entrapping electrocatalyst enables ultrahigh mass activity for the two-electron oxygen reduction reaction[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(19): 10583-10587.

[21] Liu L, Xiong Q, Li C, *et al*. Simultaneously modulating the morphology and electronic structure of carbon-fiber: A strategy for constructing an efficient electrocatalyst for the in situ production of H_2O_2 over a wide pH[J]. Nanoscale, 2025, 17(40): 23449-23457.

[22] Peng W, Liu J, Liu X, *et al*. Facilitating two-electron oxygen reduction with pyrrolic nitrogen sites for electrochemical hydrogen peroxide production[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 4430.

[23] Mou Z, Mu Y, Liu L, *et al*. In-plane topological-defect-enriched graphene as an efficient metal-free catalyst for pH-universal H_2O_2 electrosynthesis[J]. Small, 2024, 20(29): 2400564.

[24] Tian Q, Jing L, Yin Y, *et al*. Nanoengineering of porous 2D structures with tunable fluid transport behavior for exceptional H_2O_2 electrosynthesis[J]. Nano Letters, 2024, 24(5): 1650-1659.

(下转第 41 页)

参考文献

[1] 丁静怡,吴玉淋,王一兴,等."双碳"目标下液流电池技术进展与展望[J].科学通报,2026,71(2):339-354.

[2] 刘涛,葛灵,张一敏.全钒液流电池关键技术进展与发展趋势[J].中国冶金,2023,33(4):1-8,133.

[3] 曲大为,杨帆,范鲁艳,等.钒氧化还原流电池技术综述[J].吉林大学学报:工学版,2022,52(1):1-24.

[4] 魏甲明,刘召波,陈宋璇,等.全钒液流电池技术研究进展[J].中国有色冶金,2022,51(3):14-21.

[5] Kamakshi B,Ratikanta N,Sushil K V,*et al*.Recent advances in development and application of polymer nanocomposite ion exchange membrane for high performance vanadium redox flow battery[J].Journal of Energy Storage,2024,97:112850.

[6] 王泓,张开悦.全钒液流电池碳毡电极的热处理活化研究[J].储能科学与技术,2025,14(2):488-496.

[7] Mukhopadhyay A,Yang Y,Li Y,*et al*.Mass transfer and reaction kinetic enhanced electrode for high-performance aqueous flow batteries[J].Advanced Functional Materials,2019,29(43):1903192.

[8] 郝亚玲,李春丽,周楠,等.不同氮源掺杂石墨烯电极材料的制备及电化学性能[J].化工进展,2025,44(9):5150-5160.

[9] Zhang K,Yan C,Tang A.Interfacial co-polymerization derived nitrogen-doped carbon enables high-performance carbon felt for vanadium flow batteries[J].Journal of Materials Chemistry A,2021,9(32):17300-17310.

[10] Yu Q Q,Liu J Q,Han H J,*et al*.Room-temperature diazonium grafting of pyridinic-N onto graphite felt enhances electrode kinetics in vanadium redox flow batteries[J].Journal of Colloid and Interface Science,2026,705:139503.

[11] Tang Z,Zou J,Zhang D,*et al*.Ti_xO_y loaded carbon felt as high performance negative for vanadium redox flow battery[J].Journal of Power Sources,2023,566:232925.

[12] Singh G,Kaur A,Lim J W.MXene-SnO_2 modified carbon felt electrode for enhanced performance in vanadium redox flow batteries[J].Composite Structures,2026,379:120001.

[13] 白明雨,金也,苏士焜,等.全钒液流电池电极材料改性策略的研究进展[J].石油学报:石油加工,2026,42(3):725-736.

[14] Zhang K,Wang H,Zhang X,*et al*.Controlled construction of a N-doped carbon nanotube network endows carbon felt with superior performances for high-rate vanadium flow batteries[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2024,12(19):7318-7328.

[15] Zhang Z,Jiang S,Zhang A,*et al*.Construction of gradient-structured carbon nanofiber electrodes utilizing polyvinylpyrrolidone as a gradient inducer for vanadium redox flow batteries[J].Journal of Energy Storage,2026,145:119944.

[16] Cui Y,Hu Y,Wang Y,*et al*.Tertiary amino-modified GO/Nafion composite membrane with enhanced ion selectivity for vanadium redox flow batteries[J].Radiation Physics and Chemistry,2022,195:110081.

[17] Wang T,Lee J,Wang X,*et al*.Surface-engineered Nafion/CNTs nanocomposite membrane with improved voltage efficiency for vanadium redox flow battery[J].Journal of Applied Polymer Science,2022,139(7):51628.

[18] Bukola S,Li Z,Zack J,*et al*.Single-layer graphene as a highly selective barrier for vanadium crossover with high proton selectivity[J].Journal of Energy Chemistry,2021,59:419-430.

[19] An H,Zhang R,Li W,*et al*.Surface-modified approach to fabricate nafion membranes covalently bonded with polyhedral oligosilsesquioxane for vanadium redox flow batteries[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2022,14(6):7845-7855.

[20] 肖伟,孟昭函,宋云东.全钒液流电池用质子交换膜的研究进展[J].辽宁大学学报:自然科学版,2024,51(1):16-23.

[21] 叶洲麟,熊雷,林起浪,等.全钒液流电池用磺化聚芴醚酮质子交换膜的制备及性能[J].精细化工,2024,41(2):348-357,380.

[22] Sharma J,Khan H,Upadhyay P,*et al*.Stable poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) based cross-linked cationic polyelectrolyte membrane with Ionic microstructure modification for efficient VRFB performance[J].ACS Applied Energy Materials,2023,6(1):447-460.

[23] Duburg J C,Chen B,Holdcroft S,*et al*.Design of polybenzimidazolium membranes for use in vanadium redox flow batteries[J].Journal of Materials Chemistry A,2024,12(11):6387-6398.

[24] Pang B,Wu X,Yang M,*et al*.Anionic conductive group tunable amphoteric polybenzimidazole ion conductive membrane for vanadium redox flow battery[J].Journal of Membrane Science,2023,670:121351.

[25] 张佳璇,蒋峰景.液流电池用多孔离子膜的研究进展[J].电池,2023,53(3):333-337.

[26] Iskhakova L,Cao Z,Sun X,*et al*.Preactivated zeolite nanosheet plate-tiled membrane on porous PVDF film:Synthesis and study of proton-selective ion conduction[J].Journal of Membrane Science,2023,669:121328.

[27] Zhang D,Zhang X,Luan C,*et al*.Zwitterionic interface engineering enables ultrathin composite membrane for high-rate vanadium flow battery[J].Energy Storage Materials,2022,49:471-480.■

(上接第 35 页)

[25] Qi H,Zhang L,Zhang C,*et al*.Highly efficient acidic electrosynthesis of hydrogen peroxide in air-fed conditions accelerated by a three-dimensional cross-linked carbon nanoweb catalyst[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2025,13(24):9021-9029.

[26] Xia L,Luo M,Shao C,*et al*.Highly efficient metal-free coal-based carbon aerogel catalyst for oxygen reduction to produce hydrogen peroxide[J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2025,64(9):4870-4881.

[27] Zhang D,Tsounis C,Peng L,*et al*.Nitrogen-doped vertical graphene for highly efficient hydrogen peroxide electrosynthesis in acidic environment[J].Chemical Engineering Journal,2024,496:154221.

[28] Lee K,Lim J,Lee M J,*et al*.Structure-controlled graphene electrocatalysts for high-performance H_2O_2 production[J].Energy & Environmental Science,2022,15(7):2858-2866.

[29] Tian Q,Jing L,Du H,*et al*.Mesoporous carbon spheres with programmable interiors as efficient nanoreactors for H_2O_2 electrosynthesis[J].Nature Communications,2024,15(1):983.■